تحقیق عددی و تجربی روی یک متمرکزکننده سهموی خورشیدی*
مقاله پژوهشی

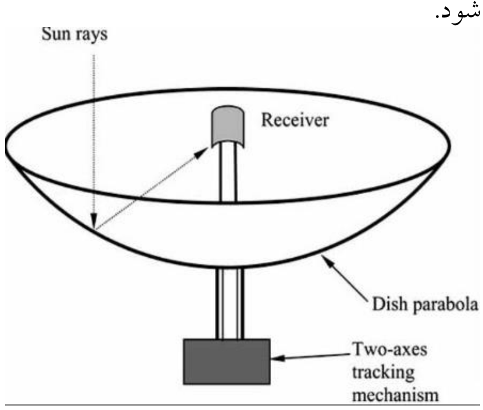
محمد شفیعی دهج[۱]　　محسن میرزایی[۲]　　مصطفی زمانی محی‌آبادی[۳]

چکیده *در این مقاله سیستم خورشیدی از نوع متمرکزکننده‌ای خورشیدی سهموی نقطه‌ای، مطالعه عددی و تجربی شده است. در کنار طراحی، ساخت و آزمایش کلکتور، سیستم در نرم‌افزار کامسول نیز مدل‌سازی شده است. آزمایشات و مدل‌سازی با استفاده از ۲جاذب لوله‌ای مارپیچ و صفحه‌ای فین شکل در نقطه کانونی با ۳دبی مختلف و در ۲ سیکل بسته و باز انجام شده است. مقایسهٔ نتایج تجربی و شبیه سازی تطابق خوبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد و میزان خطا بین ۱ تا ٤درصد است. نتایج نشان می‌دهد که جاذب نوع اول در مقایسه با جاذب نوع دوم کارایی بهتری دارد. همچنین با افزایش دبی راندمان کلکتور افزایش می‌یابد.*

واژه های کلیدی مدل‌سازی، دیش شلجمی خورشیدی، تحلیل گرمایی، جاذب.

مقدمه

دیش سهموی نقطه‌ای دارای مقطعی سهموی است که به دور یک محور (شلجمی) می‌چرخد و به‌حالت بشقابی درمی‌آید. از این سیستم برای متمرکزکردن تشعشع‌های خورشیدی در یک نقطه استفاده می‌شود. این دیش‌ها قادر هستند شار حرارتی زیادی را در کانون خود تولید کنند. از این گرما می‌توان برای تولید الکتریسیته، گرم‌کردن سیال مبرد، آب شیرین‌کن‌ها و... استفاده کرد. این دیش ها معمولا دارای دنبال‌کننده خورشیدی و جاذب به شرح ذیل هستند. دنبال‌کردن خورشید به۲طریق اتفاق می‌افتد: ۱- دنبال‌کردن زاویه ارتفاع و زاویه عمود بر زمین. ۲- دنبال‌کردن قطبی. در روش اول متمرکزکننده روی صفحه‌ای موازی صفحه زمین می‌چرخد و جهت‌های عمودی و افقی را دنبال می‌کند. در روش دوم، کلکتور حول محوری موازی محور زمین می‌چرخد که نرخ حرکتش ۱۵درجه در ساعت است و محور دیگر، محور عمود بر محور قطبی است که گردش حول این محور به‌آهستگی انجام می‌شود و در طول سال، مثبت یا منفی رادیکال ۲۳درجه تغییر می‌کند. بیشتر سیستم‌ها در مقیاس کوچک از این روش پیروی می‌کنند (شکل ۱). انرژی بازتاب‌کننده پس از جمع‌آوری در کانون به موتور انتقال داده می‌شود.



شکل ۱ شماتیک دیش سهموی نقطه‌ای.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۲/۲۷و تاریخ پذیرش ۱٤۰۰/۲/۱۱ آن می‌باشد.　　**DOI**: 10.22067/jacsm.2021.56667.0

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان.
Email: m.shafiey@vru.ac.ir

(۲) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان.

(۳) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان..

تاکنون تحقیقاتی در زمینه دیش‌های شلجمی انجام شده است که در ادامه به چند نمونه از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. در سال۱۸۷۸ موشوت اولین کلکتور خورشیدی با متمرکزکننده مخروطی‌شکل را طراحی کرد. آینه‌های داخل مخروط، اشعه‌های خورشید را در نقطه‌ای در وسط مخروط ناقص که جذب‌کننده‌ای در آن‌جا نصب شده بود، متمرکز می‌کرد. این کلکتور را اکسیکون (Axicon) نامیدند. در سال‌های بعد، انرژی دریافت‌شده از خورشید، در مواردی مانند تأمین قدرت ماشین‌های چاپ یا تقطیر و شیرین‌کردن آب استفاده شد [۱]. صالح علی و همکارانش مطالعاتی را با هدف توسعه سه‌بعدی مبحث استاتیک متمرکزکننده‌های خورشیدی با رویکرد کاهش هزینه ارائه کردند [2]. کاوشیکا و ردی از یک دیش ماهواره‌ای با قطر ۲/٤۰۵متر و قاب آلومینیمی استفاده کردند که کوچک‌بودن بازتابنده، وزن و هزینه سیستم را کاهش می‌داد [3]. اودرین و همکارانش، یک متمرکزکننده سهموی با قطر ۲/۲متر و با ضریب بازتابش ۸۵درصد را بررسی تجربی کردند که نتایج دمای مرکز کانون را ٤۰۰درجه سانتی‌گراد نشان می‌داد و میانگین دمای ثبت‌شده نیز ۳۸۰درجه سانتی‌گراد بود. همچنین بیشترین شار تابشی در منطقه آزمایش‌شده ۷۰۰وات بر مترمربع ثبت شد. همچنین آن‌ها نشان دادند که استفاده از این سیستم‌ها برای کاربردهای حرارتی با دماهای بالا امکان‌پذیر است [4]. رافو و آبکادیر طراحی ساده‌ای از یک دیش شلجمی ارائه کردند و ۲نمونه دیش از جنس‌های فولاد ضدزنگ و یک نوع ترکیب شیمیایی از نوع آکریلونیترال (Acrlonitrile butadiene styrenr) را ساختند [5]. نتایج نشان داد که هندسه جاذب تأثیرات زیادی روی بازده اپتیکی سیستم‌های سهموی دارد، همچنین افزایش عمق متمرکزکننده و استفاده از مواد با بازتابش مناسب تأثیرات زیادی روی بازده نوری می‌گذارد. یکییونگ لیو و همکارانش روش طراحی یک متمرکزکننده با مساحت کوچک در مقیاس آزمایشگاهی را برای تحقیق و مطالعه روی دمای میانگین متمرکز کننده‌های خورشیدی ارائه کردند. نتیجه کار آن‌ها تولید ۸/۱۵ کیلووات انرژی الکتریکی روی یک جاذب ۱۵سانتی‌متری با نسبت تمرکز ۱۰۸ بود [6]. کویانجون و همکارانش هزینه بهره‌وری و تأثیر آن را بر روی سیستم‌های خورشیدی بررسی و تحقیق کردند [7]. آن‌ها از روش جهت‌یابی مونت‌کارلو برای محاسبه توزیع شار تابشی روی جاذب استفاده کردند و همچنین برای محاسبهٔ تشعشع و مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد دمای آب خروجی و انرژی ورودی به‌صورت خطی با افزایش تابش مستقیم سطحی افزایش می‌یابد، اما انرژی خروجی به‌صورت غیرخطی با افزایش تابش مستقیم سطحی افزایش می‌یابد. اسوانمورزی و شوانگووگام درباره بازده حرارتی خوراک‌پزهای خورشیدی تحقیق کردند [8]. ردی و همکارانش تحقیقات تجربی خود را روی یک دیش سهموی خورشیدی با مساحت ۲۰مترمربع انجام دادند. آن‌ها عملکرد یک جاذب تعدیل‌شده (اصلاح‌شده) را درباره میانگین تلفات حرارتی بررسی کردند [9]. آن‌ها مقدار اتلافات حرارتی جاذب را که بر اثر وزش باد (برخورد مستقیم باد به سطح جاذب و برخورد غیرمستقیم باد به اطراف جاذب) به وجود می‌آید، بررسی کردند. نتاج آن‌ها نشان داد وزش مستقیم باد روی سطح جاذب، تأثیر زیادی در اتلافات حرارتی نسبت به وزش غیرمستقیم باد دارد.

جونس و وانگ توزیع شار را روی جاذب استوانه‌ای با دیش سهموی محاسبه کردند و با استفاده از روش هندسهٔ نوری پارامترهایی ازقبیل خطای سطح متمرکزکننده و خطای نقطه‌یابی خمیدگی دیش را شرح دادند [10]. نتایج به‌دست‌آمده آن‌ها نشان داد توزیع شار تابشی روی سطح جاذب در اطراف (دورتادور)سیلندر جاذب مشهودتر از دیگر نواحی است و انحرافات سیستم همراه با نسبت قطر می‌تواند تأثیرات زیادی بر روی نتایج داشته باشد. این انحرافات حتی در نسبت

قطرهای خیلی کوچک هم می تواند روی مقادیر شدت تمرکز در پیرامون جاذب اثرگذار باشد. تاکار مطالعه خود را روی روش‌های صنعتی‌کردن دیش‌های سهموی متمرکز کرد و مدل‌های ریاضی برای کاربردهای گرمایی، اتلافات حرارتی، خطاهای سیستم و محاسبات مربوط به متمرکزکننده‌های سهمی‌گون ارائه داد [11]. بلازکویز آزمایش‌های اپتیکی برای دیش‌های سهموی با موتور استرلینگ را که نمونهٔ اولیهٔ آن را کتر ساخته بود، ارائه کرد [12]. هدف از این تحقیق شرح پارامترهای اپتیکی برای نمونهٔ اولیهٔ متمرکزکنندهای سهموی نقطه‌ای بود.

زیژانژ با آزمایش‌هایی که انجام داد، مقدار شار تابشی تولیدشده روی جاذب متمرکزکننده را با استفاده از روش جهت‌یابی مونت‌کارلو بررسی کرد [13]. وی همچنین روند تغییر شار تابشی را برای متمرکزکنندهٔ ایدئال و واقعی با استفاده از انتشار نور اشعهX برای قطرهای مختلف دهانهٔ ورودی کلکتور و جاذب‌های مختلف ارزیابی کرد. نتایج نشان داد زمانی که جاذب را به جلو یا عقب حرکت می‌دهیم، می‌توانیم شار توزیعی را یکنواخت‌تر کنیم، اما بازده متمرکزکننده به‌علت پراکندگی پرتوهای روی جاذب کاهش می‌یابد. شوای روش جهت‌یابی مونت‌کارلو را با خواص نوری برای پیش‌بینی عملکرد تشعشعی محفظه جاذب سیستم دیش متمرکزکننده خورشیدی ترکیب کرد [14]. همچنین تأثیر نحوهٔ تابش خورشیدی و خطای سطح مبتنی بر تابش یکسان را مطالعه کرد. شوای نشان داد که نحوهٔ تابش خورشیدی بر توزیع شار خورشیدی مؤثر است و مقدار گردهٔ خورشیدی تأثیر کمی روی نقطهٔ اوج منحنی نسبت تمرکز دارد، ولی شعاع کانونی با افزایش گردهٔ خورشیدی افزایش می‌یابد. با افزایش خطای سطح، شار توزیعی کاهش می‌یابد و شکل هندسی جاذب تأثیرات مهمی در توزیع شار حرارتی دارد. همچنین با بررسی ۵محفظهٔ جاذب نشان داد که جاذب کروی عملکرد بهتری نسبت به بقیه دارد. پاولوویک و همکارانش [15] با مدل‌سازی یک متمرکزکننده سهموی، مقدار بازده انرژی، اگزرژی و همچنین فاصله بهینه بین بازتابنده و جاذب را بررسی کردند. جتر [16]توزیع مقدار شار در صفحهٔ کانونی را تحقیق و بررسی کرد. او توانست مقدار انرژی توزیع‌شده به‌وسیلهٔ شار حرارتی را در صفحه کانونی در حالت ایدئال محاسبه و آن را روی نمودار ترسیم کند. این نمودار به‌عنوان نموداری مرجع برای استفاده در پژوهش‌هایی از این دست شد. شوبنل و همکارانش تأثیرات شکل خورشیدی را بر توزیع شار در متمرکزکننده‌های خورشیدی بررسی کردند [17]. آن‌ها برای انجام آزمایش‌های خود از روش‌های جهت‌یابی مختلفی استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با افزایش طول موج، مقدار پهنای عرضی کانون افزایش می‌یابد و در مقابل نسبت تمرکز در جاذب نیز کاهش می‌یابد.

چین کین چام و همکارانش تأثیرات برخورد تابش مستقیم سطحی بر متمرکزکننده‌های سهموی خورشیدی را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی سیستم را انجام دادند [18]. نتایج آن‌ها نشان داد با کاهش تابش مستقیم سطحی، توان ورودی به جاذب کاهش می‌یابد و میزان تلفات پرتوهای خورشیدی افزایش می‌یابد. بنابراین برای افزایش توان ورودی به جاذب باید میزان تابش مستقیم سطحی افزایش یابد. کاپاتکار و همکارانش یک دیش سهموی با قطر ۱/٦متر و با ضریب بازتابش ۰/۸ را آزمایش کردند [19]. هدف آن‌ها بررسی عملکرد حرارتی یک جاذب از جنس مس بود. آن‌ها همچنین عملکرد نسبت تمرکز جاذب مدنظر را با تغییر گام در مارپیچ کویل بررسی کردند. لیفانگ لی و همکارانش مباحث طراحی دیش‌های سهموی را بررسی کردند [20]. یکی از نکات مهم در استفاده از دیش‌های سهموی برای رسیدن به بازده و دمای بالا، تولید متمرکزکننده‌هایی با قطر دهانه بزرگ است. در همین راستا در این مقاله یک طرحی ارائه شد که بتوان متمرکزکننده‌هایی با قطر ۳۰ متر و بازده ۹۰ درصد تولید کرد. مون و همکارانش از یک

سیستم سهموی خطی برای بررسی عددی عملکرد شار تابشی و تغییرات دما روی سطح جاذب استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی سیستم را انجام دادند. آن‌ها از ۳ نوع سیال به‌عنوان سیال عامل استفاده و عملکرد حرارتی هر کدام را جداگانه بررسی کردند [21]. حافظ و همکارانش مقاله‌ای درباره طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی حرارتی سیستم‌های خورشیدی از نوع متمرکزکننده/بشقابی را ارائه کردند [22]. آن‌ها پس از بحث‌های تئوری درباره این نوع سیستم‌ها و ابعاد مختلف آن (شامل زاویه ریم، قطر دهانه دیش، قطر دهانه جاذب، محل کانون، فاصله کانون، ارزیابی حرارتی سیستم و...) و ارائه فرمول‌های طراحی مورد نیاز، طرح جدیدی ارائه کردند. ردی و همکارانش اثرات اتلافات حرارتی ناشی از جابه‌جایی طبیعی و اتلافات حرارتی ناشی از تابش بر روی جاذب را بررسی کردند [23]. نتایج آن‌ها نشان داد که اتلافات حرارتی ناشی از جابه‌جایی طبیعی بسیار تحت‌تأثیر موقعیت جاذب است و زمانی که جاذب در موقعیت زاویهٔ کمتر از ٤٥ درجه نسبت به افق قرار می‌گیرد، بیشترین اتلافات حرارتی را دارد. روجاس مورین و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار کامسول ارزیابی حرارتی جاذب یک دیش سهموی نقطه‌ای را بررسی کردند [24]. جاذب استفاده‌شده از یک قطعهٔ استوانه‌ای تشکیل شده بود که این قطعه از ۲مکانیزم برای افزایش دما استفاده می‌کرد. مکانیزم‌های استفاده‌شده شامل گرمایش القایی و گرمایش به‌وسیلهٔ متمرکزکنندهٔ سهموی خورشیدی بود. نتایج آن‌ها نشان داد در گرمایش القایی، انرژی زیادی برای گرمایش قطعه نیاز است، اما زمانی که این ۲مکانیزم باهم ترکیب می‌شوند، انرژی زیادی را می‌توان ذخیره کرد.

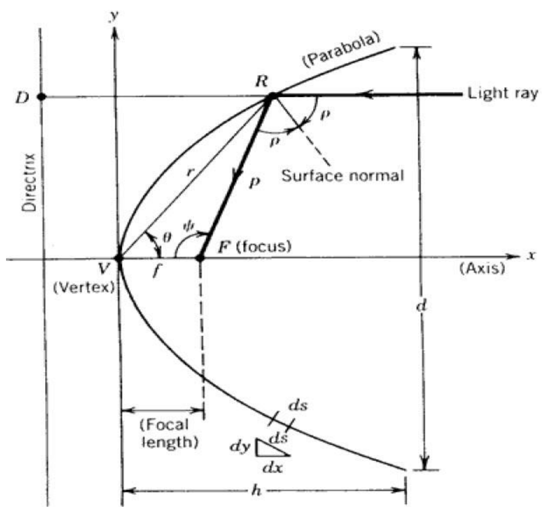
تیروناوکاراسو و چرالاتان عملکرد انرژی و اگزرژی یک نوع جاذب مارپیچی را در یک دیش متمرکزکنندهٔ سهموی خورشیدی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایجش را ارائه کردند. آن‌ها تجزیه و تحلیل عملکرد تجربی در سطوح مختلف تابش را انجام دادند و متوسط بازده حرارتی گیرندهٔ لولهٔ مارپیچی را ٥٦/٢ درصد به‌دست آوردند [25]. در یک تحقیق دیگر، ونکاتاچالام و چرلاتان بازده حرارتی و ترمودینامیکی یک جاذب مخروطی با نسبت‌های منظری مختلف در یک دیش متمرکزکنندهٔ سهموی خورشیدی را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی و آنالیز کردند. نتایج نشان داد که نسبت منظری تأثیر چشمگیری بر عملکرد جاذب خورشیدی دارد .[26] آوارگانی و همکاران یک سیستم جدید خورشیدی یکپارچه (شامل یک دیش متمرکزکنندهٔ سهموی خورشیدی، جاذب استوانه‌ای مارپیچی و ۲سری مبدل حرارتی فین–لوله) را برای بازسازی مواد خشک‌شویی در سیستم‌های تهویه مطبوع خورشیدی ارائه کردند. آن‌ها این سیستم را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند و فهمیدند که عملکرد این سیستم در بازسازی مواد خشک‌کننده از سیستم‌های دیگر بهتر است [27]. چیف و همکاران یک مطالعهٔ پارامتریک از یک دیش متمرکزکنندهٔ سهموی خورشیدی به‌منظور تعیین بهترین تنظیمات و دستیابی به عملکرد بهینهٔ سیستم را بررسی کردند. آن‌ها برخی شبیه‌سازی‌های عددی برای ٤لولهٔ جاذب انجام دادند. تجزیه و تحلیل حرارتی اثبات کرد که داده‌های خروجی از جاذب تحت‌تأثیر خصوصیات هندسی جاذب است [28]. وانگ و همکاران تحولات مهم متمرکزکنندهٔ نقطه‌ای کوچک در دههٔ گذشته را بررسی و پیشرفت‌های فنی این متمرکزکننده‌ها و عملکرد مربوط به آن‌ها را ارائه کردند [29]. بیدیک و همکاران طرح‌های جدید و روش‌های تولیدی را در سال‌های گذشته برای متمرکزکننده‌های خورشیدی صفحهٔ سهموی ساختند. آن‌ها یک بررسی از چندین طرح خود را ارائه کردند که اکنون دارای حق ثبت اختراع در ایالات متحده، اسپانیا و مکزیک است و مزایای این نمونه‌های پیشنهادی را براساس ساختار، روش تنظیم سطح سهموی و الگوریتم‌های اتوماسیون ساخت و مونتاژ این دستگاه‌ها تجزیه و تحلیل کردند [30].

باتوجه‌به تحقیقات گذشـــته، در پژوهش پیش رو یک متمرکزکنندۀ سهموی نقطه‌ای خورشیدی با استفاده از ۲ جاذب مختلف و در ۲ سیکل بسته و باز بررسی عددی و تجربی می‌شود. در پژوهش‌های انجام‌شده این موضوع بررسی نشده است. همچنین این جاذب‌ها که ایدۀ طراحی و ساخت آن‌ها در همین پروژه ارائه شده، در پژوهش‌های دیگر تحقیق و بررسی نشده است.

مدل‌سازی و دستگاه آزمایشی

کلیات متمرکزکننده‌های سهموی خورشیدی

یک سهمی مکان هندسی نقاطی است که در طول یک خط و نقطۀ ثابت حرکت می‌کند که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ دیش سهموی

در شـــکل فوق خط ثابت را directrix می‌نامند و نقطۀ ثابت را کانون (F) می‌نامند. طول خط RD و FR باهم برابر است. زاویۀ بین پرتوهای رسیده به سهمی و انتقال داده‌شده به کانون با ρ مشخص شده است. خط عمود نسـبت به خط ثابت که از نقطۀ کانونی می‌گذرد، محور سهمی نام دارد. نقطۀ برخورد سهمی با این خط رأس سهمی (V) را ایجاد می‌کند که حدفاصل بین خط ثابت و کانون(F) قرار می‌گیرد. قســـمت‌های مختلف و دیگر دیش به‌صورت زیر بیان می‌شود:

۱. سطح ناحیۀ ورودی دیش: کل سطح متمرکزکننده که پرتوهای خورشیدی روی آن قرار می‌گیرد.
۲. قطر دهانه ورودی دیش: قطر دیش (در شـــکل با d نشان داده شده است).
۳. فاصلۀ کانونی: فاصله‌ای است بین رأس سهمی تا کانون سهمی که در شکل با (VF) مشخص شده است.
٤. زاویۀ ریم: نســبت بین فاصـــلۀ کانونی و قطر دیش (f/d).
٥. عمق دیش: بیشترین فاصله بین رأس دیش تا دهانۀ ورودی سهمی (در شکل با h مشخص شده است).
٦. طول سهمی: مقدار اندازۀ محیطی سهمی (در شکل با S مشخص شده است).

مدل‌سازی

شبیه‌سازی سیستم. در بخش شبیه‌سازی جریان، ابتدا باید بسیاری از شرایط شبیه‌سازی تعیین شود. در ابتدا، تجزیه و تحلیل داخل مسیر جاذب انتخاب می‌شود، زیرا آب در داخل لوله جریان می‌یابد. پس از این، باید ضریب هدایت حرارتی در جامدات و مقدار تابش خورشید را تعیین کرد. تابش به‌صورت ثابت و عمودی بر روی روزنۀ (نقطۀ کانون) بازتابنده انتخاب شده است. سپس باید جنس مادۀ جاذب مشخص شود. جنس جاذب، آلومینیم و یک نوع آینۀ خاص برای بازتابنده انتخاب شده است. آب به‌عنوان سیال کاری در این شبیه‌سازی انتخاب شده است. تولید مش این مدل با تأکید بر بهبود و اصلاح سلول‌ها با نرم‌افزار SolidWorks ایجاد شده است. با اصلاح مش زنی، هم‌گرایی بهتر و نتایج مقبول‌تر می‌شود [30]. حدود ۲ میلیون المان (سلول) در شبیه‌سازی حرارتی جاذب تولید شده است. در تجزیه و تحلیل نوری که با استفاده از ابزار شبیه‌سازی جریان انجام شده است، ۲ میلیون پرتو خورشیدی برای

شبیه‌سازی مسئله انتخاب شده است. شکل (۳) مدلی که در نرم‌افزار ایجاد شده است را نشان می‌دهد. این مدل در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شد و برای تحلیل به نرم‌افزار کامسول منتقل شد. همان‌طور که در شکل (٤) می‌بینید، جاذب در نقطهٔ کانونی به‌صورت یک کویل که حول یک نقطه تابیده شده، مشخص است و جریان از سمت ورودی به‌سمت خروجی هدایت می‌شود.

در ورودی میزان دبی جرمی آب ورودی و دمای یکنواخت به‌عنوان شرط مرزی و ورودی جاذب انتخاب شد و شرط مرزی خروجی و فشار استاتیک در خروجی جاذب براساس فشار محیط اطراف تنظیم شد. آخرین شرط مرزی، تعیین نحوهٔ انتقال گرما بین سطح خارجی جاذب و محیط است. این نکته شایان ذکر است که برای تعیین شرایط کار متفاوت، دمای ورودی آب در شرایط مرزی مناسب تغییر کرده است. پس از این مرحله، سطح تابش انتخاب و منعکس‌کننده به‌عنوان یک سطح متقارن برای انعکاس اشعه خورشید تعیین شد. همچنین در روش ردیابی اشعه، بازتاب‌ها برای دستیابی به نتایج مطلوب تنظیم شدند. برای سطح خارجی جاذب، با تنظیم میزان انتشار و جذب مناسب، سطح تابش جدید ایجاد شده است.

صفحهٔ کانونی پس از جذب انرژی گرمایی از کلکتور متمرکزکننده سهموی نقطه‌ای، انرژی خود را با مکانیزم انتقال حرارت هدایتی به دیوارهٔ لوله‌ها که متصل به صفحهٔ کانونی است، منتقل می‌کند. در نرم‌افزار کامسول برای ارتباط بین فیزیک نوری و فیزیک انتقال حرارت جامدات، گزینه‌ای را با عنوان مرز منبع حرارتی (Boundery Heat source) در نظر گرفته است که می‌توان این ۲ فیزیک را در این قسمت باهم ترکیب کرد (مدل مولتی‌فیزیک). برای محاسبه مقدار شار حرارتی ازدست‌رفته، برای محیط به‌دلیل انتقال حرارت بین صفحهٔ کانونی و محیط اطراف (در اثر جابه‌جایی طبیعی و اجباری) در این نرم‌افزار از گزینهٔ شار حرارتی (Heat flux) استفاده شده است. درنهایت، تعیین شرایط مناسب برای هم‌گرایی است. شرط دمای محیط برای مایعات و سطح دمای جامد به‌عنوان اولین شرط انتخاب شده است، زیرا این شرط منجر به هم‌گرایی می‌شود. همچنین دمای متوسط حجمی در خروجی جاذب و میانگین دمای سطح جاذب به‌عنوان دمای سطح انتخاب شده است. علاوه‌براین، انرژی خورشیدی گرفته‌شده به‌وسیلهٔ جاذب که یک پارامتر بسیار مفید برای بهینه‌سازی نوری است، به‌عنوان هدف انتخاب شده است [32].

برخی دیگر از فرضـیات برای این مدل‌سـازی به‌صورت زیر است:

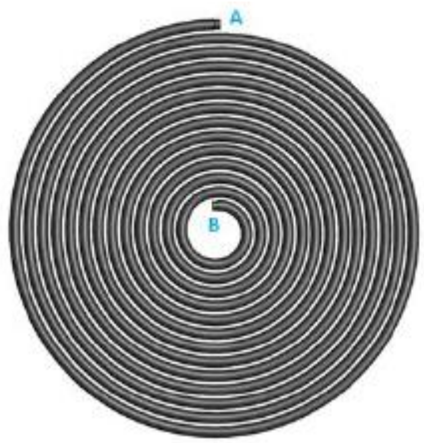
۱. توزیع شار در سطح لوله یکنواخت فرض می‌شود.
۲. فرض می شود که جریان سیال کاملا تو سعه یافته و غیرقابل تراکم است.
۳. انتقال حرارت حالت ثابت در نظر گرفته می‌شـود تا شار گرما در دیوار تغییر نکند.
٤. ضـریب هدایت گرمایی جاذب یکنواخت و ثابت است.

با تغییر دبی ورودی، کلکتور در شـرایط مختلف کاری برر سی شده ا ست. همچنین، با تغییر فا صلهٔ بین جاذب و بازتابنده، تجزیه و تحلیل نوری انجام شـده است.

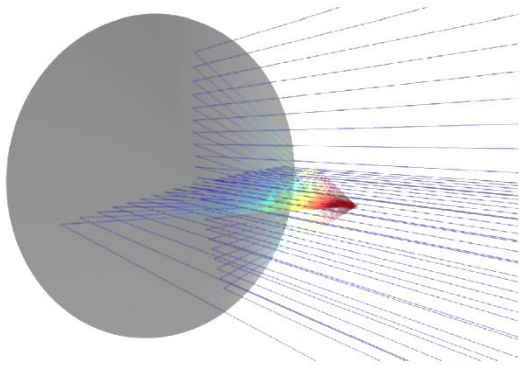
شبیه‌سازی اپتیکی. دیش‌های متمرکزکننده پرتوهای خورشید را در یک نقطه روی کانون متمرکز می‌کنند. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، پرتوهای خورشیدی که از سمت راست متمرکزکننده به متمرکزکننده برخورد کرده است، همه در یک نقطهٔ کانونی جمع‌آوری شده‌اند که در این نقطه شار حرارتی زیادی تولید می‌شود.



شکل ۳ شماتیک مدل شبیه‌سازی‌شده



شکل ٤ شماتیک جاذب لوله‌ای مارپیچ



شکل ۵ پرتوهای رسیده به متمرکزکننده و بازتابش‌شده

از مفاهیم کاربردی و اصلی دربارهٔ عملکرد سیستم‌های خورشیدی سهموی نقطه‌ای، مفهوم نسبت متمرکز است که منظور نسبت شار حرارتی مفید به‌دست‌آمده از شار خورشیدی رسیده به متمرکزکننده است. به‌نوعی نسبت تمرکز بالا را می‌توان قابلیت دیش سهموی در تولید شار گرمایی بیشتر در نقطهٔ کانونی به حساب آورد. اگر طراحی دیش هندسی به‌خوبی انجام نشده باشد یا ضریب جذب و خطای سطح متمرکزکننده مقادیر مناسبی نباشد، در مفهوم نسبت تمرکز تأثیرگذار بوده و ممکن است این مقدار را کم یا زیاد نشان دهد. برای محاسبهٔ این مقدار می‌توان شار خورشیدی به‌وجودآمده روی صفحهٔ کانونی یا محفظهٔ جاذب را محاسبه کرد. معمولا از روش‌های زیر برای محاسبهٔ نسبت تمرکز استفاده می‌شود:

۱. مدل شـوای که از روش جهت‌یابی مونت‌کارلو برای محاسبهٔ نسبت تمرکز استفاده کرده است.
۲. مدل جتر که از روش نیمه‌تحلیلی برای محاسـبهٔ نسـبت تمرکز و توزیع میزان شـدت پرتو های خورشیدی روی صفحه کانونی استفاده کرده است.
۳. روش اسـتا ندارد دیگری که در خیلی از مراکز تحقیقاتی خورشـیدی برای اندازه‌گیری شـار خورشیدی به کار می‌رود، استفاده از دستگاه CCD (charge coupled device) است.

روش استفاده‌شده جتر بیشتر مبتنی بر مبانی تئوری و به‌صورت ایدئال بررسی شده است، ولی روش شوای به‌صورت عملی بررسی شده و نزدیک به واقعیت است.

برای مدل‌سازی دیش، در قسمت کتابخانه نرم‌افزار کامسول [33] برای ارزیابی مبحث بازتابش (آینه ها)، مدل دیش‌های شلجمی مختلف طرح‌ریزی شده است که می‌توان با تغییر ابعاد و اندازه از آن برای مدل مدنظر استفاده کرد. پس از انتخاب دیش مدنظر، ابعاد سیستم که شامل f= ۹۰cm (فاصله کانونی) و زاویهٔ ریم ۳۸ درجه است، در آن وارد می‌شود و صفحهٔ دایروی نازک به شعاع ۵سانتی‌متر در نقطهٔ کانونی آن قرار داده می‌شود که اندازه‌گیری شار حرارتی و نسبت تمرکز روی آن صفحه تعیین می‌شود. یکی از شرایط مرزی که در قسمت تحلیل‌های نوری به کار رفته، شرط مرزی مربوط به خواص بازتابشی متمرکزکننده است که در روی

صفحهٔ متمرکزکننده به کار می‌رود. برای پرتوهای خارج‌شونده از این صفحه می‌توان مقادیر اولیه مربوط به پرتوها را که شامل ضریب جذب، بیشترین زاویه خورشیدی، شار خورشیدی انحراف سطح، زبری سطح و... است، در این بخش وارد کرد.

در این بخش شدت هر کدام از پرتوها به‌طور منحصربه‌فرد و جداگانه محاسبه می‌شود. هر کدام از پرتوها دارای مقدار انرژی هستند. برای معرفی صفحهٔ کانونی در این بخش از گزینهٔ دیوار استفاده می‌شود و برای محاسبه شدت شار توزیعی پرتوها روی کانون از گزینهٔ توان پرتوهای ذخیره‌شده استفاده می‌شود. با به‌دست‌آوردن میزان شار تصاحب‌شده در کانون، می‌توان نسبت تمرکز را محاسبه کرد [34]. در قسمت ضریب جذب می‌توان میزان جذب پرتوهای خورشیدی و بازتابش آن به کانون را وارد کرد که این میزان برای سیستم مدنظر ۲۵درصد در نظر گرفته شده است. این بدان معنی است که ۷۵درصد از پرتوهای رسیده به دیش به کانون بازتابش می‌شود. همهٔ پرتوهای رسیده از سمت خورشید به زمین به‌دلیل اختلاف زاویه بین زمین و خورشید کاملا موازی نیستند. این اختلاف زاویه بین زمین و خورشید که در بیشترین مقدار خود به (mrad) ٤/٦٥ می‌رسد، باعث می‌شود پرتوهایی که از طرف صفحهٔ خورشیدی به زمین می‌رسد، به‌شدت پرتوهای موازی خورشید نباشد، به همین دلیل پرتوهای ساطع‌شده از متمرکزکننده در وسط دیش دارای شدت بیشتری نسبت به اطراف دیش است که این پدیده را تاریکی نواحی اطراف خورشید می‌گویند. در بخش شرط مرزی خواص بازتابشی متمرکزکننده می‌توان این اختلاف زاویهٔ خورشید و زمین را وارد کرد.

دستگاه آزمایشی

سیستم خورشیدی دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان (شکل٦) از چند قسمت به شرح زیر تشکیل شده است:

۱. دیش سهموی: دیش سهموی از نوع نقطه‌ای دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان با زاویه ریم برابر با ۳۸درجه و فاصله کانونی ۹۱سانتی‌متر، سطح و قطری به‌ترتیب $A=$ ۱/۳٤٤٦^2 و d=/۳۰۸٤ m را تشکیل می‌دهد. سطح داخلی دیش مدنظر با آینه پوشانده شده که طبق آمار و نتایج تجربی و به‌استناد از مقالات مقدار خطای سطح و ضریب جذب به‌ترتیب ۲/۵ mrad و ۰/۳۵در نظر گرفته شده است.

۲. سازه: ساختمان سازه به‌نحوی است که تجهیزات استفاده‌شده در این سیستم روی آن سوار می‌شود. این سازه به‌نحوی طراحی شده است که می‌تواند خورشید را به‌وسیلهٔ ۲موتور خود در آسمان دنبال کند و در هر لحظه نقطهٔ کانون دیش سهوی را روی جاذب تنظیم کند. لوله‌های انتقال سیال و جاذب همراه با دیش حرکت می‌کنند. برای مقابله با نیروی باد در قسمت پایین سازه، ۲تکیه‌گاه در نظر گرفته شده است که می‌توان سازه را به‌وسیلهٔ آن‌ها روی زمین محکم کرد.

۳. لوله‌های انتقال سیال: برای این منظور از لوله ۱/۲ از جنس گالوانیزه استفاده شده است که با عایق‌بندی مناسب، اتلافات حرارتی آن کاسته شده است. طول لولهٔ به‌کاررفته ۸ متر است.

٤. پمپ و مخزن: برای به‌جریان درآوردن و همچنین ذخیرهٔ سیال از یک پمپ گریز از مرکز (توان W ۱۲۰، ظرفیت lit/min ۲۰ و هد m ۹) و یک مخزن استفاده شده است. حجم مخزن استفاده شده ۹لیتر است. دبی عبوری نیز با استفاده از روتامتر اندازه‌گیری می‌شود. همچنین از یک شیر کنترل جریان برای تنظیم دبی نیز استفاده شده است.

۵. جاذب: جاذب قطعه‌ای است که برای جذب گرمای کانون در مرکز دیش سهوی قرار می‌گیرد. در این سیستم ۲ نوع جاذب طراحی و ساخته شده که هر کدام به‌صورت جداگانه بررسی و نتایج آن ثبت شده است:

جاذب صفحه‌ای فین‌دار (نوع اول): در این جاذب که از آلومینیم ساخته شده، محفظه‌ای طراحی شده و در آن از پره‌هایی برای انتقال حرارت استفاده شده است (شکل ۷–الف).

برای ورود و خروج جریان سیال یک ورودی و یک خروجی برای آن در نظر گرفته شده است. قسمتی از این جاذب که دقیقا جلو پرتوهای متمرکزکننده قرار می‌گیرد که صفحه‌ای به‌ضخامت ۱/۵میلی‌متر و پره‌هایی به‌ضخامت ۰/۵میلی‌متر است. پشت محفظه به‌وسیلهٔ قطعه‌ای فلزی بسته شده است که محفظه را آب‌بندی می‌کند. در وسط محفظه نیز برای سوارکردن قطعات روی همدیگر یک پیچ تعبیه شده است.

جاذب لوله‌ای مارپیچ (نوع دوم): در این جاذب لوله‌های آلومینیمی به‌قطر ۸ میلی‌متر به‌صورت کویل‌مانند دور هم تابیده شده‌اند. پشت آن یک صفحهٔ آلومینیمی به ضخامت ۲ میلی‌متر نصب می‌شود و سیال خنک‌کننده پس از حرکت در داخل این لوله و خروج از آن وارد مخزن می‌شود که در شکل ۷–ب نشان داده شده است.



شکل ٦ دیش خورشیدی سهموی نقطه‌ای دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان



(الف)



(ب)

شکل ۷ جاذب‌های به‌کاررفته در دیش خورشیدی. الف) صفحه‌ای فین‌دار (نوع اول)، ب) لوله‌ای مارپیچ (نوع دوم)

روش انجام آزمایش‌ها. سیکل بسته: در این سیکل، سیال (آب) پس از بازشدن شیر کنترل جریان (با حداکثر دبی ۱۵ lit/min) که بعد از مخزن ۹لیتری قرار دارد، وارد پمپ می شود که بعد با فشار بالا و گذشتن از لوله‌های انتقال سیال وارد جاذب می‌شود. در این مرحله با جذب گرمای جاذب و افزایش دما دوباره وارد مخزن می‌شود و سیکل ادامه پیدا می‌کند. در این مسیر در خروجی از پمپ، یک روتامتر (Zenner international GmbH & Co) به‌صورت عمودی با دقت lit/min ۰/۱ ± نصب شده است که میزان دبی

جریان عبوری از سیکل را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری دمای سیال ورودی به جاذب، دمای سیال خروجی از جاذب و دمای محیط به کمک ترموکوپل (PT100) با دقت ۰/۲ °C ± انجام شده است. برای جلوگیری از تابش مستقیم خورشید به ترموکوپل‌ها، آن‌ها در یک پوشش مخصوص قرار داده شده‌اند. همهٔ سنسورهای استفاده شده در کلکتور به‌طور مداوم سیستم را کنترل می‌کنند، درحالی‌که سیگنال‌های خروجی هر ۵دقیقه در سیستم جمع‌آوری داده ثبت می‌شود.

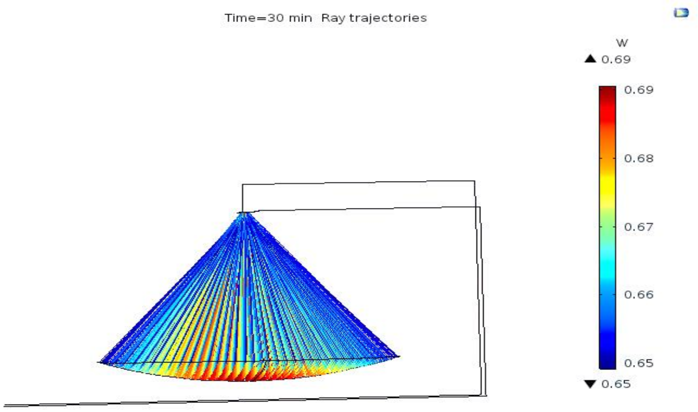
در ابتدا با آزمایش‌کردن میزان دمای محیط، وزش باد، شار خورشیدی رسیده به زمین در رفسنجان و صاف یا ناصاف‌بودن آسمان، سیکل راه‌اندازی شده است. دمای اولیهٔ سیکل به‌وسیلهٔ ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود. پس از هواگیری سیکل، آزمایش و ثبت داده‌ها انجام می‌شود. داده‌برداری سیستم، با دبی‌های ۳ و ٤ و ٥ لیتربردقیقه اندازه‌گیری انجام می‌شود. داده‌ها نیز هر ٥ دقیقه یک‌مرتبه ثبت می‌شود. هر آزمایش در چند روز انجام می‌شود و بهترین داده‌های آزمایشی انتخاب می‌شود.

سیکل باز: در این سیکل از یک مخزن که در ارتفاع بیشتری نسبت به جاذب قرار دارد استفاده شده است. در خروجی مخزن یک شیر تنظیم جریان و یک روتامتر نصب شده است. جریان سیال از سمت مخزن جاری می‌شود و پس از گذشتن از جاذب به محیط اطراف هدایت می‌شود. در خروجی از جاذب‌ها ترموکوپل نصب شده است. در این سیکل پس از بازکردن شیر خروجی مخزن و اندازه‌گیری میزان دبی جریان، سیکل راه‌اندازی می‌شود. پس از ثبت دمای خروجی سیال از جاذب که معمولا دما بعد از حدود ۹۰ثانیه ثابت می‌شود، میزان سیال جمع‌آوری‌شده در مخزن اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها در ۲هفتهٔ متوالی و در ساعات ١١ تا ١٤ انجام شده است. همچنین میزان شدت تابش خورشیدی با استفاده تابش‌سنج خورشیدی (TES-1333R),) با دقت W/m^2 ۳۲ ± به‌دست آمده است.

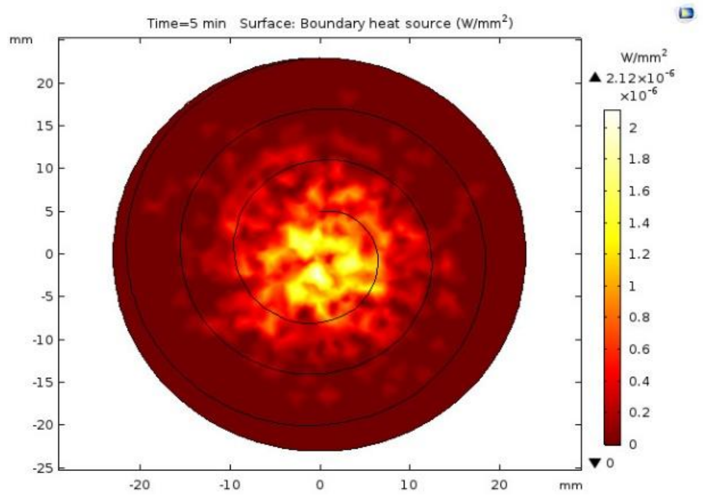
نتایج

نتایج اپتیکی(optic)

شکل (۸–الف و ب) به‌ترتیب دیش مدل‌شده در نرم‌افزار و شار حراتی ایجادشده در صفحهٔ کانونی آن را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده برای نسبت تمرکز که به‌روش جتر که قبلا توضیح داده شده، محاسبه شده است. شکل (۹) نسبت تمرکز را نشان می‌دهد. در این نمودار که به‌صورت متقارن محوری است برای ۲۰ میلی‌متر از صفحهٔ کانونی، نسبت تمرکز محاسبه شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، خارج از این شعاع مقدار نسبت تمرکز بسیار ناچیز است و می‌شود از آن صرف‌نظر کرد.

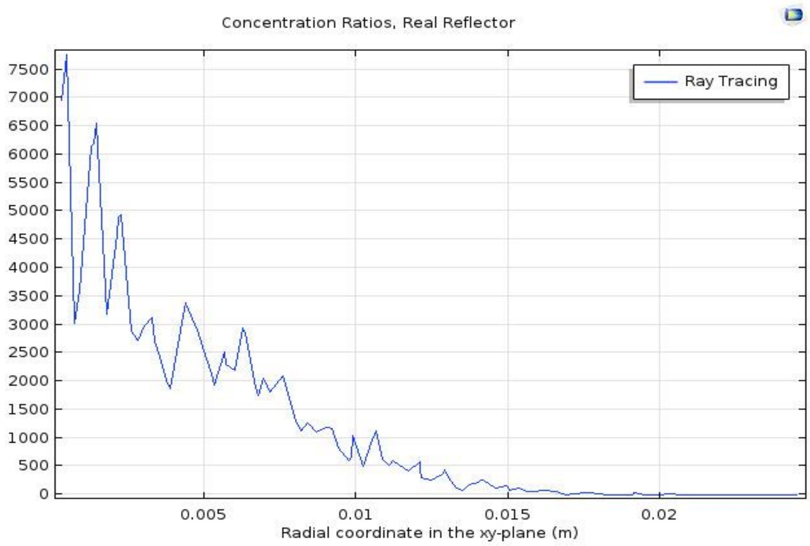


(الف)



(ب)

شکل ۸ (الف) کلکتور و پرتوهای بازتابش در صفحه کانونی، (ب) شار حرارتی ایجادشده در صفحهٔ کانونی



شکل ۹ نسبت تمرکز

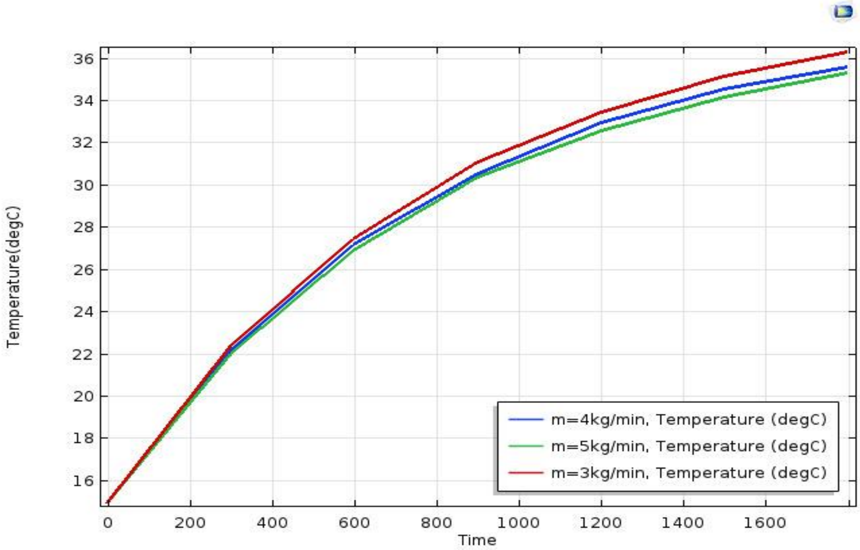
سیکل بسته

شکل(۱۰) دمای سیال خروجی را که با استفاده از مدل‌سازی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد. باتوجه‌به شکل با گذر زمان و افزایش دبی، دمای سیال خروجی نیز افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی برای سیکل بسته، مانند نتایج تجربی نشان می‌دهد که تغییرات دبی جرمی تأثیر چندانی در تغییرات دمایی ندارد. در این نمودار دما با نرم‌افزار برای هر دبی هر ۵دقیقه یک‌بار ثبت شده است. محل ثبت دما در سیکل بسته در خروجی سیال از جاذب است.

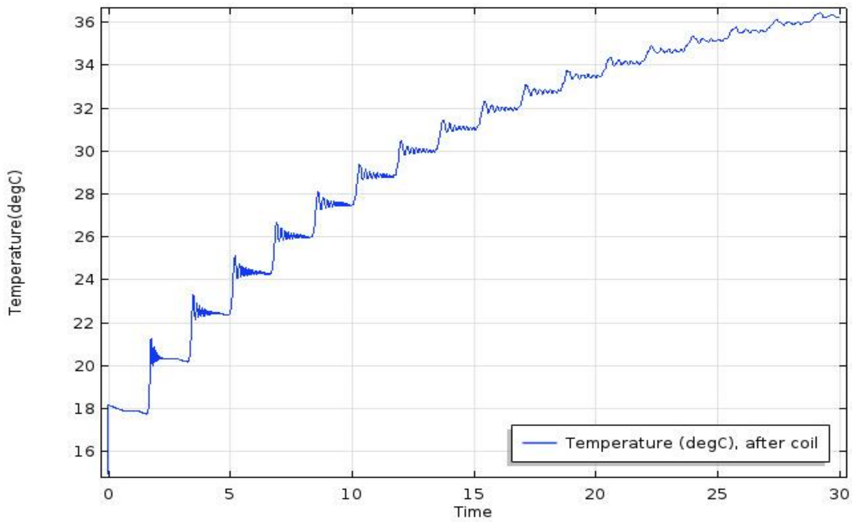
در شکل (۱۱) برای دبی ۳کیلوگرم بر دقیقه در فواصل زمانی ۰/۱ثانیه می‌توان روند تغییرات دما را در طول زمان مشاهده کرد. فرق شکل (۱۱) با شکل(۱۰) در این است که در شکل قبل دما هر ۵ دقیقه یک‌بار

ثبت شـده و در نمودار نمایش داده شـده، ولی در این شکل دما با گام‌های زمانی خیلی کوچک‌تر ثبت شده و روی نمودار نمایش داده شـده است تا بتوان وضـعیت تغییر دما را طول زمان مشاهده کرد.

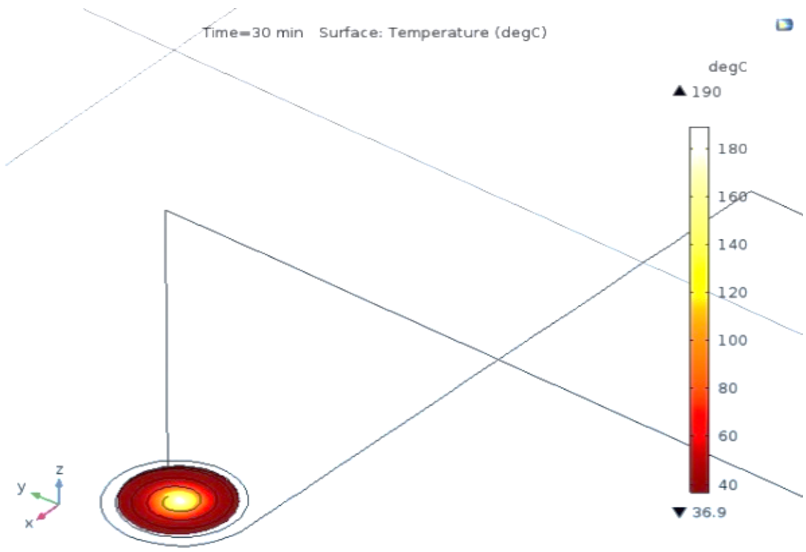
در شـکل (۱۲) دمای صـفحه کانونی که پشـت جاذب نوع دوم قرار دارد، نشان داده شده است (صفحه آلومینیمی با ضخامت ۱/۵میلی‌متر که در قسمت معرفی جاذب نوع دوم توضیح داده شده است). در شکل (۱۳) تغییرات دمای سـیال در سـیکل بسـته در طول مسـیر حرکت را می‌توان مشـاهده کرد. همان‌طور که مشـاهده می‌شـود، دمای سـیال پس از خروج از جاذب افزایش می‌یابد و پس از حرکت در مسـیر لوله‌ها و گذشـتن از مخزن به‌دلیل اتلافات حرارتی مسـیر، دمای آن کم می شود تا این‌که دوباره به ورودی جاذب بر سد و پس از گذشـتن دوباره از جاذب دمای آن افزایش می‌یابد و این سیکل به همین طریق ادامه پیدا می‌کند.



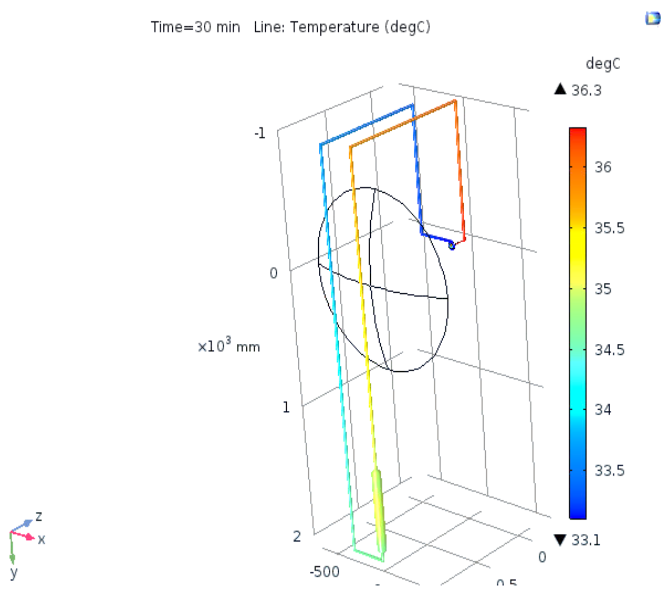
شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی برای سیکل بسته با سیال آب و جاذب لوله‌ای مارپیچ (نوع دوم)



شکل ۱۱ روند تغییرات دما در طول زمان در سیکل بسته در ۳۰ دقیقه



شکل ۱۲ دمای صفحهٔ کانونی در سیکل بسته

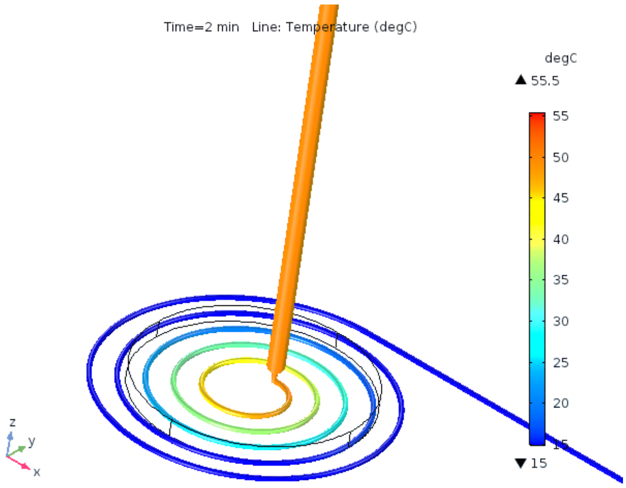


شکل ۱۳ تغییر دمای سیال در طول مسیر سیکل بسته

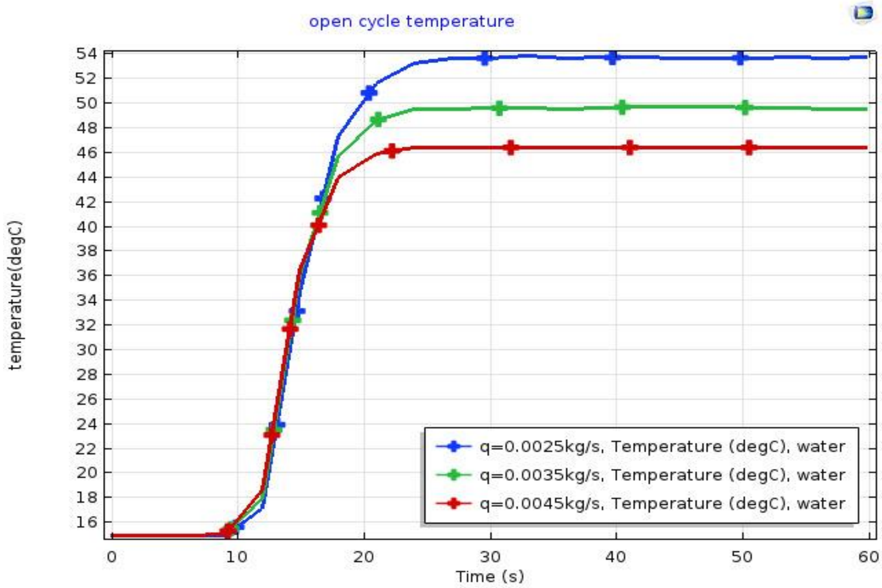
سیکل باز

جاذب نوع دوم. همان‌طور که در شکل (۱٤) مشاهده می‌شود، دمای صفحهٔ کانونی در سیکل باز خیلی بیشتر از سیکل بسته است که علت اصلی این موضوع کمتربودن دبی جریان در سیکل باز است. تغییرات دمای سیال برای جاذب نوع دوم در سیکل باز در شکل (۱٤) مشخص است. سیال از سمت ورودی وارد جاذب می‌شود و پس از افزایش دما در نقطه کانونی از سمت دیگر خارج و به‌سمت مخزن هدایت می‌شود. در سیکل بسته به‌دلیل این‌که دبی جریان زیاد است، تغییرات دما نسبت به سیکل باز که دبی آن خیلی پایین‌تر است، خیلی کمتر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازهٔ تغییرات دما در سیکل باز بیشتر از سیکل بسته است.

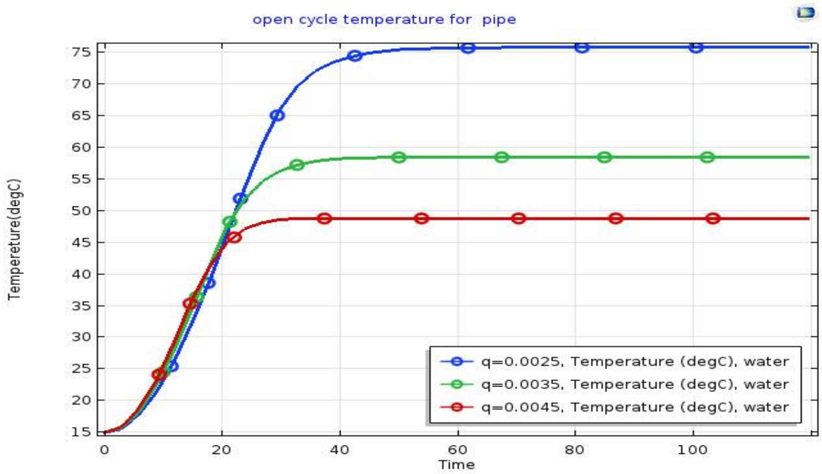
جاذب نوع اول. روند تغییرات دما برای جاذب نوع اول و دوم در سیکل باز در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در جاذب نوع اول دما سریع‌تر از جاذب نوع دوم ثابت می‌شود و دمای خروجی برای هر کدام از دبی‌ها کمتر از دمای خروجی در همان دبی برای جاذب نوع دوم است. شکل (١٦) تغییرات دمای سیال برای جاذب نوع اول در سیکل باز که در ۲ نما مشخص شده است (تصویر سمت راست نمای روبه‌رو و تصویر سمت چپ نمای بالا) را نشان می‌دهد. در سمت راست تصویر می‌توان تغییرات دمای سیال در کانون را مشاهده کرد. سیال از سمت ورودی با دمای محیط وارد شده و پس از افزایش دما در کانون از لولهٔ خروجی خارج شده است. محل ثبت دمای خروجی ۱۵سانتی‌متر بعد از جاذب در لولهٔ خروجی است که در نرم‌افزار میانگین دمای مقطع عرضی در آن محل ثبت شده است.



شکل ١٤ تغییرات دمای سیال در سیکل باز / جاذب نوع دوم:

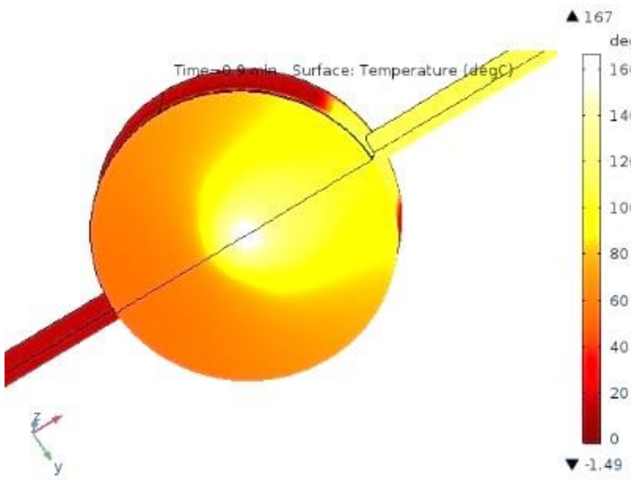


(الف)



(ب)

شکل ۱۵ نتایج مدل‌سازی برای سیکل باز با جاذب. (الف) نوع اول. (ب) نوع دوم



شکل ١٦ تغییرات دمای سیال در سیکل باز / جاذب صفحه‌ای فین‌دار (نوع اول)

مقایسه نتایج تئوری و تجربی

جدول (۱) مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی را که شامل دمای خروجی و محاسبه راندمان کلکتور است، در سیکل بسته در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، حداقل خطای شبیه‌سازی ۲/۱ و حداکثر ٤/۹درصد است. همچنین جدول (۲) مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی را که شامل دمای خروجی و محاسبهٔ راندمان کلکتور است، در سیکل باز و در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید حداقل خطای شبیه‌سازی ۱/۲ و حداکثر ۵درصد است. باتوجه‌به این جدول، با افزایش دبی دمای خروجی کاهش می‌یابد و همچنین جاذب نوع دوم به‌علت جذب بیشتر انرژی خورشیدی در مقایسه با جاذب نوع اول کارایی بهتری دارد. همچنین راندمان با افزایش دبی افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که در دبی‌های پایین به‌علت این‌که مدت زمان اقامت سیال در کلکتور بیشتر است، سیال افزایش دمای بیشتری را نسبت به دبی‌های بالاتر تجربه می‌کند، اما اتلافات

حرارتی جابه‌جایی و تشعشعی بیشتری را به‌دنبال دارد، درنتیجه با افزایش دبی، به‌دلیل آن‌که سیال مدت کمتری در معرض تابش خورشید است، اتلاف حرارتی به محیط بیرون کمتر است و درنتیجه کارایی کلکتور با زیادترشدن دبی افزایش می‌یابد. دلیل دیگر این است که حاصل‌ضرب دبی در افزایش دما باتوجه‌به رابطه زیر به‌گونه‌ای است که همچنان با افزایش دبی میزان جذب انرژی بیشتر بوده است و در نتیجه کارایی افزایش می‌یابد. در دبی‌های کم، کارایی با افزایش دبی افزایش بیشتری می‌یابد، اما در دبی‌های بالاتر مستقل از آن است، به‌عبارت دیگر، با افزایش دبی کارایی تقریبا مستقل از تغییرات آن است [35].

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_c G}$$

در معادلهٔ فوق، η راندمان حرارتی، Q_u انرژی مفید جذب‌شده توسط سیال، Q_s انرژی خورشیدی، $\dot{m}$ دبی جرمی سیال، C_p ظرفیت گرمایی سیال، T_i دمای ورودی به کلکتور، T_o دمای خروجی از کلکتور، A_c سطح مقطع مؤثر کلکتور و G شدت تابش خورشید است. به‌عبارت دیگر، با بیشترشدن دبی سیال عامل، عدد رینولدز جریان بیشتر می‌شود و این موضوع باعث افزایش ضریب انتقال حرارت کلی و و افزایش تلفات حرارتی می‌شود، اما اثر مثبت به این نکته برمی‌گردد که با افزایش دبی، دمای سیال در کلکتور کمتر افزایش پیدا می‌کند و اتلاف حرارتی کمتری با محیط اطراف خواهد داشت. از آن‌جا که رابطه افت حرارتی با اختلاف دما به‌صورت مستقیم و با ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به‌طور غیرمستقیم است، می‌توان گفت که با افزایش دبی بازده کلکتور افزایش می‌یابد.

جدول ۱ مقایسه نتایج (دمای خروجی و بازده) تجربی و عددی برای سیکل بسته در دبی‌های مختلف

جاذب		دمای خروجی (°C)			راندمان (درصد)	
	دبی(kg/min)	تجربی	عددی	خطا (درصد)	تجربی	عددی
نوع اول	۳	۲۹/۲	۳۱/۲	٤/۹	۳۰	۳٤
	٤	۲۹/۷	۳۰/۲	۲/۱	٤۱	٤۲
	٥	۳۲/٥	۳۳/۹	٤/۲	٦۱	٦٦
نوع دوم	۳	۳٤/۸	۳٦/۳	٤/۳	٤۲	٤٥
	٤	۳٤/۱	۳٥/٦	٤/٤	٥۳	٥۷
	٥	۳۳/۷	۳٥/۳	٤/۷	٦٥	۷۱

جدول ۲ مقایسه نتایج (دمای خروجی و بازده) تجربی و عددی برای سیکل باز در دبی‌های مختلف

جاذب		دمای خروجی (°C)			راندمان (درصد)	
	دبی(kg/s)	تجربی	عددی	خطا(درصد)	تجربی	عددی
نوع اول	۰/۰۰۲٥	٥۲/٥	٥۳/۷	۲/۳	۳۹	٤۰
	۰/۰۰۳٥	٤۹	٤۹/۷	۱/٤	٤۹	٥۱
	۰/۰۰٤٥	٤٤/٥	٤٦/٥	٤/٥	٥٦	٥۹
نوع دوم	۰/۰۰۲٥	۷٥	۷٥/۹	۱/۲	٥٥	٥٦
	۰/۰۰۳٥	٥٦/۳	٥۸/٥	۳/۹	٥۹	٦۱
	۰/۰۰٤٥	٤٦/۲	٤۸/٥	٥/۰	٦۲	٦٦

جمع‌بندی

در این تحقیق سیستم خورشیدی از نوع متمرکزکننده‌ای خورشیدی سهموی نقطه‌ای با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. همچنین این سیستم در سایت خورشیدی دانشگاه ولی‌عصر(عج) طراحی، ساخته و آزمایش شد. از آب به‌عنوان سیال کاری استفاده شد. شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در ۳دبی مختلف و با ۲جاذب لوله‌ای مارپیچ و صفحه‌ای فین‌شکل در ۲سیکل بسته و باز انجام شده است. مقایسهٔ نتایج تجربی و شبیه‌سازی باهم، تطابق خوبی را نشان می‌دهد و میزان خطا بین ۱ تا ۵درصد است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دبی دمای خروجی کم می‌شود و همچنین جاذب نوع دوم به‌علت جذب بیشتر انرژی خورشیدی در مقایسه با جاذب نوع اول کارایی بهتری دارد. همچنین با افزایش دبی راندمان کلکتور افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در سیکل بسته تغییرات دبی جریان تأثیرات زیادی روی دمای خروجی ندارد. در سیکل باز و جاذب نوع اول، دما خیلی سریع‌تر از جاذب نوع دوم ثابت می‌شود و در سیکل باز عملکرد جاذب نوع دوم مناسب‌تر از عملکرد جاذب نوع اول است. دمای صفحهٔ کانونی در سیکل باز بیشتر از سیکل بسته است که علت اصلی این موضوع پایین‌بودن دبی جریان و در سیکل باز است. اگر این سیستم به‌عنوان آب‌گرم‌کن خورشیدی در نظر گرفته شود، می‌توان از آن به‌عنوان آب‌گرم‌کن‌هایی که به‌صورت لحظه‌ای آب را گرم می‌کنند، استفاده کرد؛ البته در ابعاد و اندازه متمرکزکننده‌های بزرگ که به‌صورت سیکل باز یک ورودی آب سرد و یک خروجی آب گرم داشته باشند. می‌توان سیستم را به‌صورت بسته طراحی کرد تا در زمان‌هایی که سیستم نیاز به خروجی ندارد، سیال به‌وسیلهٔ یک پمپ در سیکل حرکت کند و آب را گرم نگه دارد. از همین نظر در این طرح سیستم به‌صورت سیکل باز و بسته بررسی شده است. برای به‌دست‌آوردن یک نقطهٔ کانونی ایدئال نیاز به یک سطح دیش فوق‌العاده هموار است تا پرتوهای خورشیدی رسیده به متمرکزکننده را دقیقا در یک نقطهٔ بسیار کوچک متمرکز کند. همچنین طرح آزمایش‌شده علاوه بر این‌که از لحاظ ابعاد و اندازه کوچک است، به‌علت مشکلاتی که در طراحی و ساخت (ازجمله شکستگی زیاد آینه‌ها، نبود تمرکز مناسب در کانون و خطاهای سطح متمرکزکننده) وجود داشته است، منجر به عدم دستیابی به هدف ایدئال خطا شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که برای استفاده و بهره‌برداری از چنین طرح‌هایی در مقیاس صنعتی، باید از دیش‌های شلجمی در ابعاد بزرگ‌تر استفاده شود تا بتوان انرژی لازم را به‌دست آورد.

واژه نامه

راندمان حرارتی	η
انرژی مفید جذب‌شده توسط سیال	Q_u
نرژی خورشیدی	Q_s
دبی جرمی سیال	$\dot{m}$
ظرفیت گرمایی سیال	C_p
دمای ورودی به کلکتور	T_i
دمای خروجی از کلکتور	T_o
سطح مقطع مؤثر کلکتور	A_c
شدت تابش خورشید	G

مراجع

۱. حاج سقطی، اصغر، "اصول و کاربرد انرژی خورشیدی"، چاپ دوم، تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۰).

2. Ali, I. M. S., O’Donovan, T. S., Reddy, K. S., & Mallick, T. K. "An optical analysis of a static 3-D solar concntrator", *Solar Energy*, Vol. 88, pp. 57-70, (2013).

3. Kaushika, N. D., and Reddy, K. S., "Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 41.7, pp. 713-726, (2000).
4. El Ouederni, A. R., Salah, M. B., Askri, F., Nasrallah, M. B., & Aloui, F. "Experimental study of a parabolic solar concentrator", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 12.3, pp. 395-404, (2009).
5. Rafeeu, Y., and Ab Kadir, M. Z. A., "Thermal performance of parabolic concentrators under Malaysian environment: A case study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16.6, pp. 3826-3835, (2012).
6. Liu, Z., Justin, L., and Wojciech, L., "Optical design of a flat-facet solar concentrator", *Solar Energy* Vol. 86.6, pp. 1962-1966, (2012).
7. Qianjun, M., Ming, X., Yong, S., & Yuan, Y. "Study on solar photo- thermal conversion efficiency of a solar parabolic dish system", *Environmental progress & Sustainable energy*, Vol. 33.4, pp. 1438-1444, (2014).
8. Eswaramoorthy, M., and Shanmugam, S., "The thermal performance of a low cost solar parabolic dish collector for process heat", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* Vol. 34.18, pp. 1731-1736, (2012).
9. Reddy, K. S., Sendhil, K. Natarajan., and Veershetty, G., "Experimental performance investigation of modified cavity receiver with fuzzy focal solar dish concentrator", *Renewable Energy*, Vol. 74, pp. 148-157, (2015).
10. Jones, Peter D., and Wang, L., "Concentration distributions in cylindrical receiver/paraboloidal dish concentrator systems", *Solar Energy*, Vol. 54.2, pp. 115-123, (1995).
11. Thakkar, Vanita, Ankush Doshi, and Akshaykumar Rana, "Performance analysis methodology for parabolic dish solar concentrators for process heating using thermic fluid", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vol. 12.1, pp. 101-114, (2015).
12. Blázquez, R., Carballo, J., Cadiz, P., Frasquet, M., Silva, M., Fontela, P., & Ballesteros, J. C. "Optical test of the DS1 prototype concentrating surface", *Energy Procedia*, Vol. 69, pp. 41-49, (2015).
13. Li, Z., Tang, D., Du, J., & Li, T. "Study on the radiation flux and temperature distributions of the concentrator–receiver system in a solar dish/Stirling power facility", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31.10, pp. 1780-1789, (2011).
14. Shuai, Yong, Xin-Lin Xia, and He-Ping Tan, "Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems", *Solar Energy*, Vol. 82.1, pp. 13-21, (2008).
15. Pavlovic, S. R., Stefanovic, V., & Bellos, E. "Design and Simulation of a Solar Dish Concentrator with Spiral-Coil Smooth Thermal Absorber", *International Review of Applied Sciences and Engineering*, Vol. 8.1, pp. 45-50, (2017).
16. Jeter, S. M., "The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors", *Journal of*

Solar Energy Engineering, Vol. 108.3, pp. 219-225, (1986).

17. Schubnell, M., "Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators", *Journal of solar energy engineering*, Vol. 114.4, pp. 260-266, (1992).
18. Affandi, R., Ab Ghani, M. R., Ghan, C. K., & Pheng, L. G. "The impact of the solar irradiation, collector and the receiver to the receiver losses in parabolic dish system", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 195, pp. 2382-2390, (2015).
19. Sakhare, Vinayak, and Kapatkar, V. N., "Experimental analysis of parabolic solar dish with copper helical coil receiver", *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, Vol. 1.8, pp. 199-204, (2014).
20. Li, L., and Steven, D., " A New Design Approach for Solar Concentrating Parabolic Dish Based on Optimized Flexible Petals", *Journal Mechanism and Machine Theory*, Vol. 46.10, pp. 1536-1548, (2011).
21. Mon, Mya Mya, Myat Myat Soe, and Maw Maw Htay. "3D Modeling of Temperature Distribution for Absorber Tube of Parabolic Trough Collector", *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2.6, pp. 99-103, (2015).
22. Hafez, A. Z., et al., "Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis." *Energy Conversion and Management*, Vol. 126, pp. 60-75, (2016).
23. Reddy, K. S., and N. Sendhil Kumar. "Combined laminar natural convection and surface radiation heat transfer in a modified cavity receiver of solar parabolic dish", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47.12, pp. 1647-1657, (2008).
24. Rojas-Morín, A., Flores-Salgado, Y., Barba-Pingarrón, A., Valdez-Navarro, R., Méndez, F., Alvarez, O., and Salgado-Baltazar, M., "Thermal analysis for the solar concentrating energy and induction heating for metals", *in: Proceedings of the 2013 COMSOL Conference*, Rotterdam, Holland, Vol. 1, pp. 1-16, (2013).
25. Thirunavukkarasu, V., and Cheralathan, M., "An experimental study on energy and exergy performance of a spiral tube receiver for solar parabolic dish concentrator", *Energy,* Vol. 192, pp. 116635, (2020).
26. Venkatachalam, T., and Cheralathan, M., "Effect of aspect ratio on thermal performance of cavity receiver for solar parabolic dish concentrator: An experimental study", *Renewable energy,* Vol. 139, pp. 573-581, (2019).
27. Avargani, V. M., Karimi, R., and Gheinani, T. T., "Mathematical modeling of an integrated system for regeneration of solid desiccants using a solar parabolic dish concentrator", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 142, pp. 118479, (2019).
28. Cherif, H., Ghomrassi, A., Sghaier, J., Mhiri, H., & Bournot, P., "A receiver geometrical details effect

on a solar parabolic dish collector performance", *Energy Reports,* Vol. 5, pp. 882-897, (2019).

29. Wang, L., Yuan, Z., Zhao, Y., & Guo, Z., "Review on development of small point-focusing solar concentrators", *Journal of Thermal Science,* Vol. 28(5), pp. 929-947, (2019).
30. Baydyk, T., Kussul, E., and Wunsch II, D. C., "Solar Concentrators with Flat Mirrors", *In Intelligent Automation in Renewable Energy, part of Computational Intelligence Methods and Applications book series*, Springer, Cham, pp. 23-43, (2019).
31. Pavlović, S. R., Bellos, E. A., Stefanović, V. P., Tzivanidis, C., and Stamenković, Z. M., "Design, simulation and optimization of a solar dish collector with spiral-coil thermal absorber", *Thermal science,* Vol. 20(4), pp. 387-1397, (2016).
32. Pavlović, S. R., Bellos, E. A., Stefanović, V. P., Tzivanidis, C., and Stamenković, Z. M., "Design, simulation and optimization of a solar dish collector with spiral-coil thermal absorber", *Thermal science,* Vol. 20(4), pp. 1387-1397, (2016).
33. Álvarez-Brito and Salgado-Baltazar, M., "Thermal Analysis for the Solar Concentrating Energy and Induction Heating for Metals", *In: Proceedings of the 2013 COMSOL Conference,* Rotterdam, Holland, Vol. 1, pp. 1-16, (2013).
34. Comsol, A. B. Heat Transfer Module, *User´s Guide*, COMSOL. *COMSOL Multiphysics R, Stockholm, Sweden*, Version 5, (2018).
35. Dehaj, M. S., and Mohiabadi, M. Z., "Experimental investigation of heat pipe solar collector using MgO nanofluids", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 191, pp. 91-99, (2019).

A Numerical and Experimental Investigation on the Parabolic Dish Solar Concentrator

Mohammad Shafiey Dehaj[1] Mohsen Mirzaei[2]
Mostafa Zamani Mohiabadi[3]

1. Introduction

A parabolic dish concentrator is used to concentrate solar radiation at one point. This dish is able to generate a lot of heat flux in its focus. This heat can be used to generate electricity, heat refrigerant, desalination plants, etc. These dishes usually have a solar tracker and absorber as follows. In the present study, a parabolic concentrator of solar points (Figure 1) is used numerically and experimentally in two closed and open cycles using two different absorbers, the design and construction idea of which was done in the same project.



Figure 1. Parabolic Dish Solar Concentrator

2. Modeling and Simulating the System with COMSOL Software

Many simulation conditions must be specified in the flow simulation section. First, the analysis inside the adsorbent path is selected. Water is selected as the working fluid in this simulation. Mesh production of this model with emphasis on improving and modifying cells was created by SolidWorks software and transferred to COMSOL software. At the inlet, the mass flow rate of the inlet water and the uniform temperature were selected as the boundary condition of the sorbent inlet and the boundary condition of the outlet, the static pressure at the sorbent outlet was adjusted based on the ambient pressure. The last boundary condition is to determine how heat is transferred between the external surface of the adsorbent and the environment. After this step, the level of reflective radiation was determined as a symmetrical surface to reflect the sun's rays. To model the dish, in the library section, COMSOL software used it for the desired model by changing the dimensions and size.

In this system, two types of finned plate and helical tube absorbers were designed and made. In finned plate absorber (type 1), which is made of aluminum, a chamber is designed and in which blades are used for heat transfer. In helical tube absorber (type 2), 8 mm diameter aluminum tubes are wound in a coil-like manner (Figure 2).

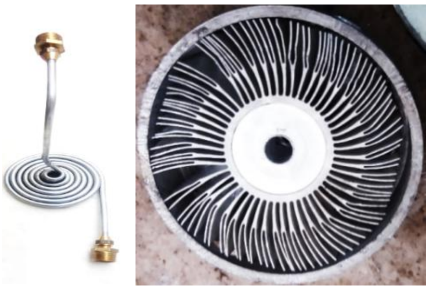


Figure 2. Absorbents used in solar dish

Closed cycle: In this cycle, the fluid (water) enters the pump after loading the flow control valve (with a maximum flow rate of 15 lit/min), which is located after the 9-liter tank, which is then pressed with high pressure and, passing through the fluid transfer pipes, enters the absorber. At this stage, by absorbing the adsorbent heat and increasing the temperature, it enters the tank again and the cycle continues. Open cycle: In this cycle, a tank that is located at a higher height than the absorber is used, a flow regulating valve and a rotameter are installed at the outlet of the tank. The fluid flow flows from the tank and after passing through the absorber, is directed to the surrounding environment. A thermocouple is installed at the outlet of the absorber.

3. Results

Figure 3 shows the dish modeled in the software and the heat flux created in its focal plane.

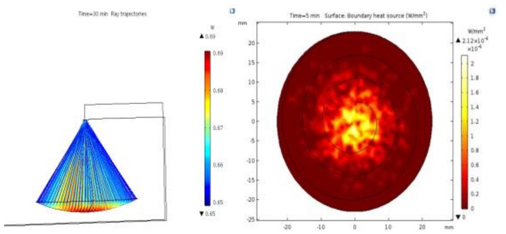


Figure 3. The collector and its reflected rays on the focal plane as well as the heat flux created on the focal plane

[1]. Corresponding Author: Associate Professor, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.
Email: m.shafiey@vru.ac.ir
[2]. Associate Professor, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.
[3]. MSc. Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.

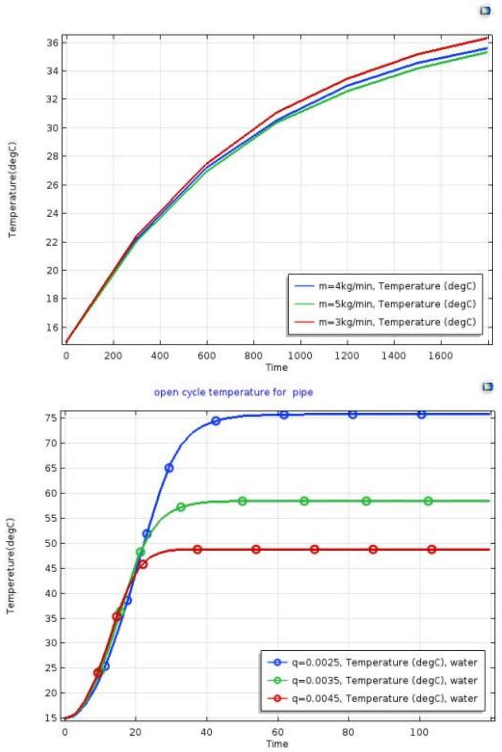


Figure 4. Temperature changes of closed and open cycles in the adsorbent

Figure 4 shows the trend of temperature changes of the second type adsorbent for closed and open cycles. The simulation results for the closed cycle, like the experimental results, show that the changes in mass flow rate have little effect on the temperature changes, the maximum value of the changes is about 0.5 °C, which is much larger in the open cycle. Tables 1 and 2 show the comparison of simulation results with experimental results which include outlet temperature and calculation of collector efficiency in closed and open cycle at different flow rates, respectively. The minimum simulation error in closed cycle is 1/2 and the maximum is 4.9%. Moreover, the minimum simulation error in the open cycle is 1.2 and the maximum is 5%. As the flow rate increases, the output temperature decreases and the second type adsorbent has better performance compared to the first type adsorbent due to the greater absorption of solar energy. Efficiency also increases with increasing flow rate.

4. Summary

In this research, the solar system of point parabolic solar concentrators was simulated using COMSOL software. This system was also designed, made, and tested on the solar site of Vali-e-Asr University. Simulations and experiments were performed in three different discharges with two helical tubular absorbers and a fin-shaped plate in two closed and open cycles with water. Comparison of experimental and simulation results shows a good agreement. As the flow rate increases, the output temperature decreases and also the second type absorber has better performance compared to the first type due to the absorption of more solar energy. Moreover, the collector efficiency increases with increasing flow. The results show that in the closed cycle, the flow rate changes do not have much effect on the output temperature. In the open cycle and the adsorbent of the first type, the temperature is fixed much faster than the adsorbent of the second type and in the open cycle, the performance of the second type of adsorbent is more suitable than the performance of the first type of adsorbent. The focal plane temperature in the open cycle is higher than the closed cycle, which is the main reason for the low flow rate in the open cycle.

Table 1. Comparison of results (output temperature and efficiency) of experimental and numerical for closed cycle in different discharges

absorbent	flow	T_{out} (ºC)		Efficiency (%)	
	L/min	Exp	Nu	Exp	Nu
	3	29.2	31.2	30	34
Type 1	4	29.7	30.2	41	42
	5	32.5	33.9	61	66
	3	34.8	36.3	42	45
Type 2	4	34.1	35.6	53	57
	5	33.7	35.3	65	71

Table 2. Comparison of results (output temperature and efficiency) experimental and numerical for closed cycle in different discharges

absorbent	flow	T_{out} (ºC)		Efficiency (%)	
	kg/s	Exp.	Num.	Exp.	Nu
	0.0025	52.5	53.7	39	40
Type 1	0.0035	49	49.7	49	51
	0.0045	44.5	46.5	56	59
	0.0025	75	75.9	55	56
Type 2	0.0035	56.3	48.5	59	61
	0.0045	46.2	48.5	62	66